

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015137802/28, 04.09.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.09.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 04.09.2015

(45) Опубликовано: 10.08.2016 Бюл. № 22

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Белоусов М.П. и др. "Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01", "Аналитика и контроль" N4 2011, стр. 429-438. US 20100219346 A1, 02.09.2010. US 8063379 B2, 22.11.2011. RU 2386147 C1, 10.04.2010. RU 2488141 C2, 20.07.2013.

Адрес для переписки:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ,
Центр интеллектуальной собственности, Марк
Т.В.

(72) Автор(ы):

Игнатьев Олег Валентинович (RU),
Белоусов Максим Павлович (RU),
Морозов Сергей Геннадьевич (RU),
Горбунов Максим Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

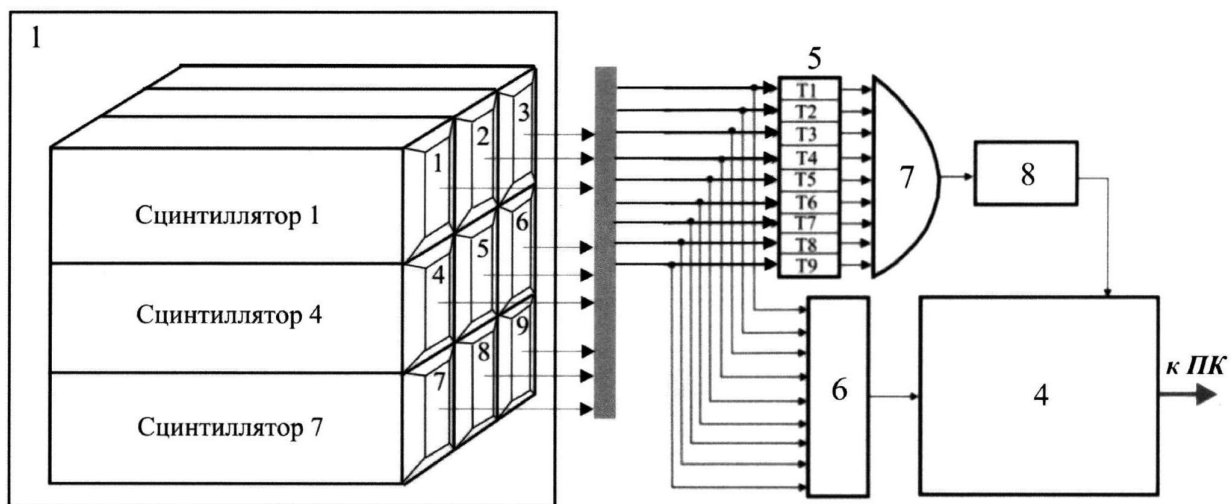
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина" (RU),
Общество с ограниченной ответственностью
"Научно-производственная компания
"АТОМ Электроникс" (RU)

(54) СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

(57) Реферат:

Изобретение относится к гамма-спектрометрам с неорганическими сцинтилляторами, имеющими зависимость световых выходов от энергии образованных в них гамма-квантами вторичных электронов. Способ улучшения энергетического разрешения сцинтилляционного гамма-спектрометра включает преобразование с помощью фотосенсора образуемых гамма-квантами в неорганическом сцинтилляторе световых вспышек в пропорциональные им электрические импульсы, обработку этих импульсов в спектрометрическом тракте, обеспечивающую измерение неискаженных наложениями параметров импульсов пропорциональных энергии сцинтилляционных вспышек и формирование в электронной памяти спектрометра аппаратного спектра, при этом гамма-кванты регистрируют сборкой из нескольких оптически изолированных между собой сцинтилляторов с индивидуальными

фотосенсорами, при этом размеры сцинтилляторов, входящих в сборку, выбирают настолько малыми, чтобы образуемые первичными гамма-квантами вторичные гамма-кванты не поглощались в данном сцинтилляторе, а преимущественно покидали его объем и детектировались другими, соседними сцинтилляторами, составляющими сборку, причем импульсы, обусловленные однократным взаимодействием гамма-квантов со сцинтилляторами в сборке, используют для формирования аппаратного спектра, а те, которые возникли одновременно на выходах двух и более фотосенсоров, соответствующих соседним сцинтилляторам, исключают из процесса формирования аппаратного спектра. Технический результат - повышение разрешающей способности сцинтилляционного гамма-спектрометра. 1 з.п. ф-лы, 7 ил.



Фиг.6

RU 2 5 9 3 6 1 7 C 1

RU 2 5 9 3 6 1 7 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015137802/28, 04.09.2015**(24) Effective date for property rights:
04.09.2015

Priority:

(22) Date of filing: **04.09.2015**(45) Date of publication: **10.08.2016** Bull. № **22**

Mail address:

**620002, g. Ekaterinburg, ul. Mira, 19, UrFU, TSentr
intelektualnoj sobstvennosti, Marks T.V.**

(72) Inventor(s):

**Ignatev Oleg Valentinovich (RU),
Belousov Maksim Pavlovich (RU),
Morozov Sergej Gennadevich (RU),
Gorbunov Maksim Aleksandrovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Uralskij federalnyj universitet
imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Eltsina"
(RU),
Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu
"Nauchno-proizvodstvennaya kompaniya
"ATOM Elektroniks" (RU)**(54) **METHOD FOR IMPROVEMENT OF ENERGY RESOLUTION OF SCINTILLATION GAMMA SPECTROMETER**

(57) Abstract:

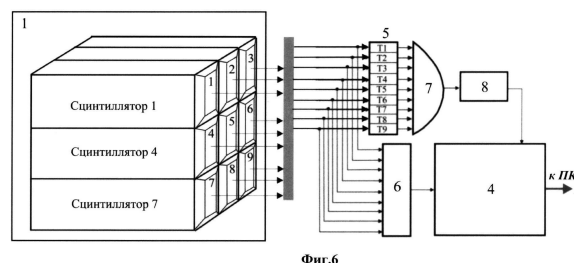
FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to gamma spectrometers with inorganic scintillators, having dependence of light output on energy of gamma-quanta of secondary electrons formed therein. Method for improvement of energy resolution of a scintillation gamma-spectrometer includes conversion by means of a photosensor of formed gamma-quanta in inorganic scintillator of light flashes into proportional electric pulses, processing of said pulses in spectrometric circuit, providing measurement undistorted blends pulse parameters proportional energy scintillation flashes and formation in electronic memory spectrometer hardware spectrum, wherein gamma-quanta are detected by an assembly of several optically insulated interconnected scintillators with individual photosensors, wherein sizes of scintillators, included in assembly, are selected so low that secondary gamma-quanta formed by primary gamma-quanta are not absorbed in scintillator, and

mainly leave volume and detected by other adjacent scintillators, components of assembly, wherein pulses caused by single interaction of gamma-quanta with scintillators in assembly, are used to generate hardware spectrum, and those that arise simultaneously at outputs of two and more photosensors corresponding adjacent scintillators, excluded from process of forming hardware spectrum.

EFFECT: high resolution of scintillation gamma-spectrometer.

1 cl, 7 dwg



Настоящее изобретение относится к области спектрометров ионизирующих излучений, точнее к сцинтилляционным спектрометрам гамма-излучения с неорганическими сцинтилляторами, для которых характерна достаточно сильная зависимость предельно достигаемого энергетического разрешения от размеров применяемого сцинтиллятора.

Типичный сцинтилляционный спектрометр энергий содержит (фиг. 1) неорганический сцинтиллятор, оптически сочлененный с ним фотосенсор (PhS), образующие детектор 1; зарядочувствительный предусилитель 2 или резистор нагрузки 3 и процессор детекторных импульсов 4. Сцинтиллятор служит для преобразования энергии поглощенных в нем гамма-квантов в световые вспышки пропорциональной интенсивности. PhS, в качестве которого чаще всего применяют вакуумный фотоэлектронный умножитель, преобразует световые вспышки в пропорциональные импульсы тока. Зарядочувствительный предусилитель, являющийся по сути интегратором, преобразует импульсы тока фотосенсора в экспоненциальные импульсы напряжения с постоянной времени спада $\tau_{PA} \geq 50 \mu s$ и временем нарастания T_r , определяемым длительностью импульса тока PhS. Процессор детекторных импульсов выполняет функции усиления; формирования детекторных импульсов с амплитудой, пропорциональной площади импульса тока на аноде фотоумножителя (а значит, и энергии кванта); стабилизации базовой линии спектрометра, инспекции и режекции наложенных во времени сигналов, преобразования амплитуд сформированных импульсов в цифровой код и передачу этих кодов в устройство накопления, обработки и визуализации спектров (обычно это какой-либо персональный компьютер, но может быть и специализированный микропроцессор).

Современные фотоумножители, вакуумные и кремниевые (SiPM), характеризуются высоким коэффициентом усиления G_{phe} числа образованных в материале фотокатода светом фотоэлектронов ($G_{phe} = 10^5 \div 5 \times 10^6$). Поэтому принципиальной необходимости применения зарядочувствительного предусилителя, который с детекторами без внутреннего усиления обеспечивает минимизацию вносимых электронным трактом шумов, здесь нет [Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014 г. 323 с.]. В ряде случаев ограничиваются простой резистивной нагрузкой на аноде РМТ, обычно это 50Ω для согласования с кабелем [Belousov M.P. и др. Портативный сцинтилляционный гамма-спектрометр СТАРК-01. Аналитика и контроль. V. 15 (2011). №4. Р. 429-438; Belousov M.P. et al. Scintillation spectrometer SBL-1 for the x-ray densitometer of radioactive technological solutions. Analytics and Control V. 17 (2013) №1, Р. 21-26].

Важнейшими показателями качества сцинтилляционного гамма-спектрометра, определяющими его применимость для решения тех или иных задач, являются энергетическое разрешение (η) и эффективность регистрации γ -излучения (ϵ). И тот и другой показатели зависят в первую очередь от материала сцинтилляционного кристалла и его размеров.

Типичный аппаратный, полученный при регистрации сцинтилляционным γ -спектрометром излучения источника, испускающего γ -кванты одной энергии, приведен на фиг. 2.

В этом спектре есть две характерные области. Выделенный штриховкой пик имеет форму, близкую к гауссовой, и обусловлен полным поглощением в сцинтилляторе γ -квантов. Положение на оси энергий центра тяжести этого пика соответствует энергии испускаемых радиоактивным источником γ -квантов. Конечная ширина пика обусловлена флуктуациями числа фотонов света, образованных поглощенными в сцинтилляторе γ -

квантами.

Непрерывное распределение слева от пика полного поглощения называют комптоновским континуумом. Этот континуум обусловлен вылетом за пределы сцинтилляционного кристалла части вторичных (комптоновских) γ -квантов. Полное
 5 число отсчетов в спектре за время экспозиции соответствует полному числу зарегистрированных γ -квантов, а полное число отсчетов в спектре, деленное на время экспозиции, дает интенсивность регистрации излучения.

Как хорошо известно [Knoll G.F. // Radiation Detection and Measurement. 3-rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. 802 p.], при энергии γ -квантов более 1022KeV возможно
 10 взаимодействие их с веществом детектора в соответствии с эффектом образования пар. Типичный аппаратный спектр в этом случае выглядит, как на фиг. 3, где помимо пика полного поглощения присутствуют еще два пика с энергиями, меньшими на 511 и 1022KeV.

Независимо от механизма взаимодействия зарегистрированных γ -квантов с веществом
 15 сцинтиллятора (полное поглощение, комптоновское рассеяние или эффект образования пар) сцинтилляции вызываются образующимися при поглощении γ -квантов электронами.

В практике сцинтилляционной спектрометрии хорошо известен феномен ухудшения энергетического разрешения с ростом размеров сцинтилляционного кристалла даже при условии обеспечения полного сбора фотосенсором образуемых излучением фотонов
 20 света. Причина кроется в существовании практически для всех сцинтилляторов нежелательной зависимости световыхода (Light Yield - LY) от энергии образующихся электронов. LY имеет размерность [число фотонов света/1MeV поглощенной энергии γ -квантов]. Характер этих зависимостей для ряда популярных сцинтилляторов приведен на фиг. 4 [W. Mengesha et al. Light Yield Nonproportionality of CsI(Tl), CsI(Na) and YAP.
 25 IEEE Trans. on Nucl. Sci. V. 45, №3, 1998, p. 456-461]. Из данных фиг. 4 понятно, что LY отнюдь не является константой для данного сцинтиллятора.

В тех случаях, когда γ -кванты поглощаются не сразу, в результате фотоэффекта с передачей всей своей энергии ионизационным электронам, а лишь после комптоновского
 30 рассеяния или эффекта образования пар, энергии поглощенных квантов в конечном итоге все-таки передается электронам, но образуются несколько групп электронов со своими энергиями и тогда проявляются зависимости, показанные на фиг. 4. В результате число образованных в сцинтилляторе фотонов света при поглощении строго моноэнергетичных γ -квантов зависит от того, по каким механизмам происходили
 35 поглощения. Заметим, что главная составляющая относительного энергетического разрешения, а именно статистическая составляющая, обратно пропорциональна корню квадратному из числа образованных фотонов света. Следовательно, в силу непостоянства LY происходит дополнительное уширение пика полного поглощения. На фиг. 5 [Knoll G.F. // Radiation Detection and Measurement. 3-rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. 802 p.] графически показаны сценарии взаимодействия γ -квантов с веществом
 40 сцинтиллятора очень больших размеров, когда все вторичные γ -кванты не покидают объем сцинтилляционного кристалла и в конечном итоге передают всю свою энергию электронам, которые, в свою очередь, вызывают образование сцинтилляционных вспышек.

К настоящему времени в мировой литературе, где рассматриваются проблемы
 45 создания и применения сцинтилляционных детекторов и спектрометров, не содержится сведений о способах или устройствах, которые бы уменьшали дополнительное уширение пиков аппаратного спектра, вызванное зависимостью световыхода сцинтилляторов от энергии вторичных электронов и многостадийностью передачи им γ -квантами всей

своей (т.е. полной) энергии.

Задачей изобретения является создание способа улучшения энергетического разрешения сцинтилляционного гамма-спектрометра, основанного на том, что в сцинтилляционных кристаллах малых размеров вероятность многостадийной передачи

полной энергии γ -квантов вторичным электронам может быть пренебрежимо малой. Указанная задача решается тем, что гамма-кванты регистрируют сборкой из нескольких оптически изолированных между собой сцинтилляторов с индивидуальными фотосенсорами при этом размеры сцинтилляторов, входящих в сборку, выбирают настолько малыми, чтобы вторичные гамма-кванты не поглощались в данном сцинтилляторе, а преимущественно покидали его объем и детектировались другими, соседними сцинтилляторами, составляющими сборку, причем импульсы, обусловленные однократным взаимодействием гамма-квантов со сцинтилляторами в сборке, используют для формирования аппаратного спектра, а те, которые возникли одновременно на выходах двух и более фотосенсоров, соответствующих соседним сцинтилляторам, исключают из процесса формирования аппаратного спектра. Таким образом, создается детектор любого большого объема с разрешающей способностью, соответствующей детекторам малых размеров.

Реализация способа показана на фиг. 6, где приведена одна из возможных структурных схем с детектором 1, содержащим, например, 9 оптически изолированных неорганических сцинтилляционных кристаллов, поименованных "Сцинтиллятор1÷Сцинтиллятор9" с индивидуальными кремниевыми фотосенсорами (SiPS), например кремниевыми фотоумножителями (SiPM). Выход каждого из фотосенсоров соединен со своим входом аналогового сумматора 6- и 9-канальной схемы таймирования (схемы хронирования) сигналов 5. Каждый из элементов таймирования ($T1 \div T9$) в ответ на входные импульсы от фотосенсоров выдает стандартизованные по длительности короткие логические импульсы, "привязанные" к моменту появления аналоговых входных импульсов. Выходы 9-канальной схемы таймирования соединены с одноименными входами 9-канальной схемы совпадений 7. Логика работы схемы совпадений 7 отличается от стандартной. Сигнал на ее выходе образуется при одновременном появлении импульсов на двух ее и более входах, а не обязательно всех девяти. Выходной сигнал схемы совпадений 7 призван сигнализировать о том, что произошло рассеяние γ -кванта внутри одного из сцинтилляторов, и, соответственно, о необходимости запрета измерения амплитуд всех возникших одновременно импульсов. Одновибратор 8, включенный между выходом схемы совпадений 7 и входом "запрет" стандартного процессора 4 спектрометрических импульсов, необходим для предотвращения преждевременного прихода запрещающего импульса.

Аналоговый сумматор 6 выполняет роль пассивного, т.е. времяинвариантного, коммутатора и может быть выполнен просто на резисторах.

Стандартный процессор детекторных импульсов 4 может ничем не отличаться от применяемых с обычными сцинтилляционными детекторами. Он выполняет функции усиления детекторных импульсов, формирования их с целью увеличения отношения сигнал/шум, стабилизации базовой линии спектрометра, режекции наложенных во времени импульсов, преобразования амплитуд импульсов в цифровой код, формирование аппаратного спектра и передачи его в персональный или иной компьютер для последующей обработки.

На фиг. 7 показаны две характерные ситуации, иллюстрирующие функционирование спектрометра. Пусть в $t=t_1$ возник импульс на выходе фотосенсора SiPS1. Поскольку

на остальных фотосенсорах сигналов нет, то сигнал запрета не вырабатывается, этот импульс стандартным образом обрабатывается процессором спектрометрических импульсов.

Пусть в $t=t_2$ сигналы возникают на выходах 5-го и 6-го фотосенсоров например. Это означает, что либо в 5-м, либо в 6-м сцинтилляторе произошло неупругое рассеяние γ -кванта и рассеянный γ -квант был зарегистрирован соседним сцинтиллятором (6-м или 5-м). Схема совпадения срабатывает, одновибратором вырабатывается запрещающий импульс и кодирования суммарного импульса с двух сцинтилляторов не происходит. Аналогичные операции происходят в случае одновременного срабатывания большего

числа фотосенсоров.

Возможна более совершенная реализация способа. При относительно небольшом числе сцинтилляционных кристаллов в сборке, как на фиг. 6, вылетающие из ряда кристаллов рассеянные γ -кванты никак не фиксируются. Так для сцинтилляторов №1, 3, 7, 9 возможен вылет через две боковые грани, а для сцинтилляторов №2, 4, 6, 8 - через одну. Эффективность регистрации рассеянных γ -квантов можно значительно увеличить, окружив сборку из неорганических сцинтилляционных кристаллов защитным экраном из пластин дешевого органического сцинтиллятора, снабдив упомянутые сцинтилляционные пластины своими фотосенсорами, подключенными только к схеме совпадений (но не к аналоговому сумматору). При этом пластины из органического сцинтиллятора могут находиться между собой в оптическом контакте, но должны быть оптически изолированными от неорганических сцинтилляторов в сборке. Схема совпадений в этом случае должна иметь на 4 входа больше, т.е. она должна быть 13-входовой. Никакой проблемы это не составляет. Органические сцинтилляторы обладают меньше, чем неорганические, эффективностью регистрации γ -излучения из-за меньших плотности и эффективного порядкового номера Z_{eff} . В данном их применении это является скорее достоинством, чем недостатком. Дело в том, что защитный органический сцинтиллятор более прозрачен для γ -квантов, приходящих снаружи сцинтилляционной сборки, чем для рассеянных в неорганических сцинтилляторах сборки, поскольку энергия неупруго рассеянных (комптоновских и аннигиляционных) всегда ниже, чем у первичных, а вероятность взаимодействия γ -кванта с легкими веществами тем выше, чем ниже его энергия.

Технический результат применения заявляемого способа улучшения энергетического разрешения сцинтилляционного гамма-спектрометра состоит в том, что снимается противоречие между стремлением к высокой эффективности регистрации γ -излучения, определяемой для данного материала кристалла его размерами, и стремлением к достижению предельно высокой разрешающей способностью, достигаемой со сцинтилляторами малых размеров. Указанное противоречие снимается путем создания детектора требуемого объема в виде матрицы из оптически изолированных сцинтилляционных кристаллов небольших размеров с обеспечением запрета регистрации возникающих в малых кристаллах вторичных гамма-квантов соседними элементами матрицы и с защитным органическим сцинтиллятором.

Перечень фигур

Фиг. 1 Типовая структура сцинтилляционного γ -спектрометра.

Фиг. 2. Типичный аппаратурный спектр одиночной γ -линии, полученный со сцинтилляционным детектором средних размеров при $E\gamma \leq 2m_0C^2 = 1022$ кэВ. Сплошное распределение обусловлено вылетом за пределы кристалла рассеянного (комптоновского) гамма-кванта.

Фиг. 3. Типичный аппаратный спектр одиночной γ -линии при $E\gamma \geq 2m_0c^2 = 1022$ кэВ, полученный со сцинтилляционным детектором средних размеров. m_0c^2 - энергия покоя электрона; Single escape peak и Double escape peak - пики, обусловленные вылетом одного и двух аннигиляционных электронов, соответственно; Multiple Compton events - множественные комптоновские события.

Фиг. 4. Зависимость световыхода некоторых сцинтилляторов в функции от энергии образованных γ -излучением электронов. Световыход дан в относительных единицах, нормировка на единицу выполнена для всех сцинтилляторов при энергии электронов 400 кэВ.

Фиг. 5. Гипотетический случай сцинтиллятора столь больших размеров, что все вторичные γ -кванты полностью поглощаются в его объеме.

Фиг. 6. Одна из простейших реализаций способа. Детектор содержит 9 оптически изолированных сцинтилляционных кристаллов.

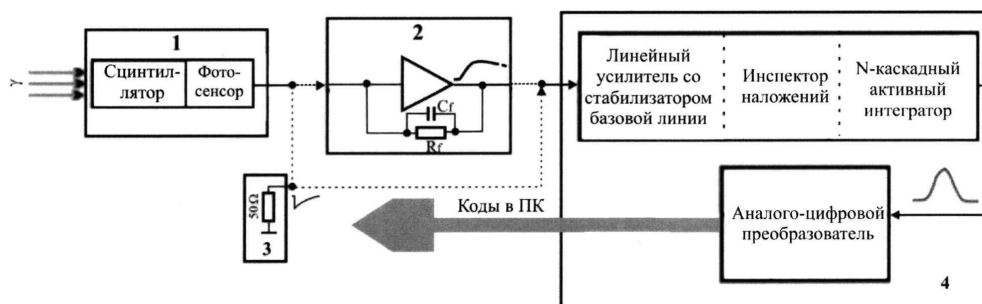
Фиг. 7. Временные диаграммы одной из реализаций спектрометра.

Формула изобретения

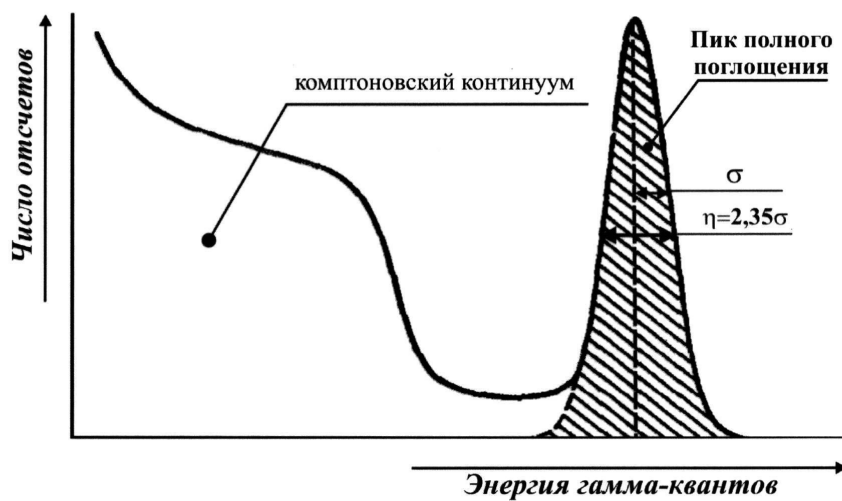
1. Способ улучшения энергетического разрешения сцинтилляционного гамма-спектрометра, включающий преобразование с помощью фотосенсора образуемых гамма-квантами в неорганическом сцинтилляторе световых вспышек в пропорциональные им электрические импульсы, обработку этих импульсов в спектрометрическом тракте, обеспечивающую измерение неискаженных наложениями параметров импульсов пропорциональных энергии сцинтилляционных вспышек и формирование в электронной памяти спектрометра аппаратного спектра, отличающийся тем, что гамма-кванты регистрируют сборкой из нескольких оптически изолированных между собой сцинтилляторов с индивидуальными фотосенсорами, при этом размеры сцинтилляторов, входящих в сборку, выбирают настолько малыми, чтобы образуемые первичными гамма-квантами вторичные гамма-кванты не поглощались в данном сцинтилляторе, а преимущественно покидали его объем и детектировались другими, соседними сцинтилляторами, составляющими сборку, причем импульсы, обусловленные однократным взаимодействием гамма-квантов со сцинтилляторами в сборке, используют для формирования аппаратного спектра, а те, которые возникли одновременно на выходах двух и более фотосенсоров, соответствующих соседним сцинтилляторам, исключают из процесса формирования аппаратного спектра.

2. Способ улучшения энергетического разрешения сцинтилляционного гамма-спектрометра по п. 1, отличающийся тем, что сборку из неорганических сцинтилляторов окружают оптически изолированным от нее защитным, например органическим, сцинтиллятором со своими фотосенсорами, при этом сигналы с фотосенсоров защитного сцинтиллятора, возникшие одновременно с сигналом от одного или нескольких фотосенсоров рабочих сцинтилляторов, входящих в сборку, используют для запрета регистрации последних.

Способ улучшения энергетического разрешения
сцинтиляционного
гамма-спектрометра

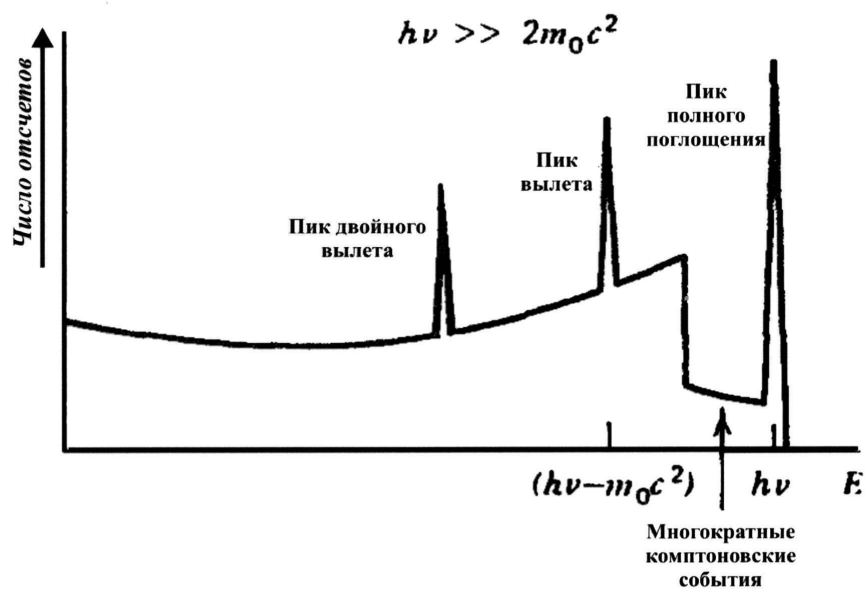


Фиг.1

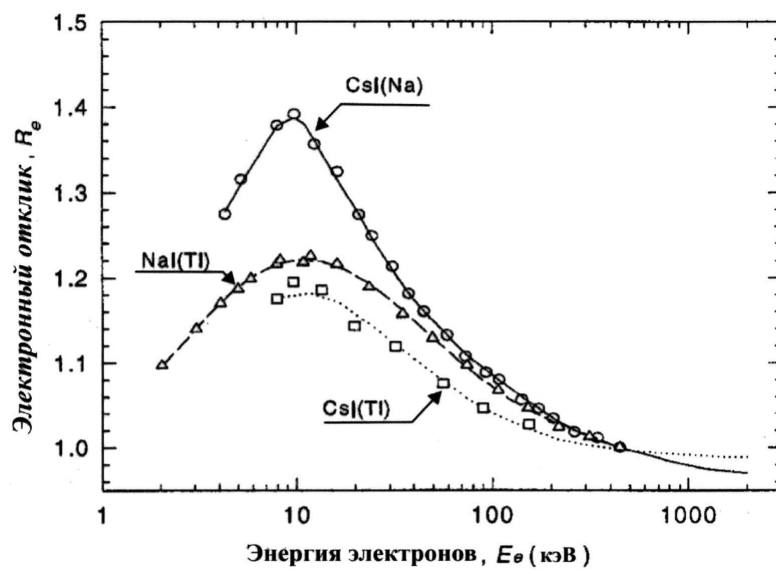


Фиг.2

Способ улучшения энергетического разрешения сцинтилляционного гамма-спектрометра

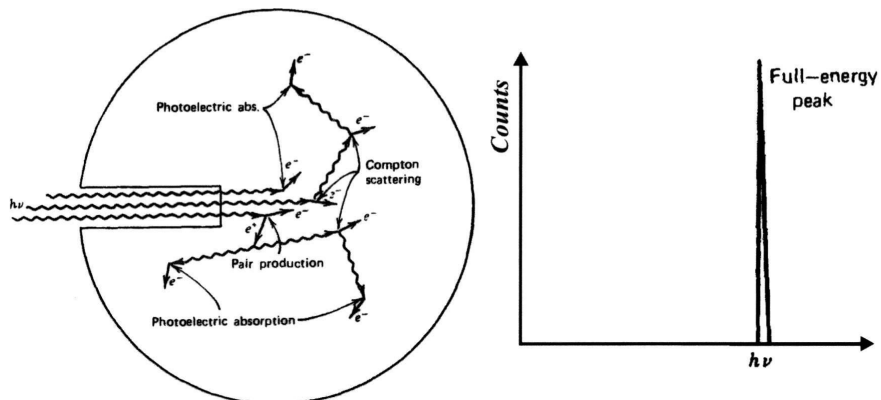


Фиг.3

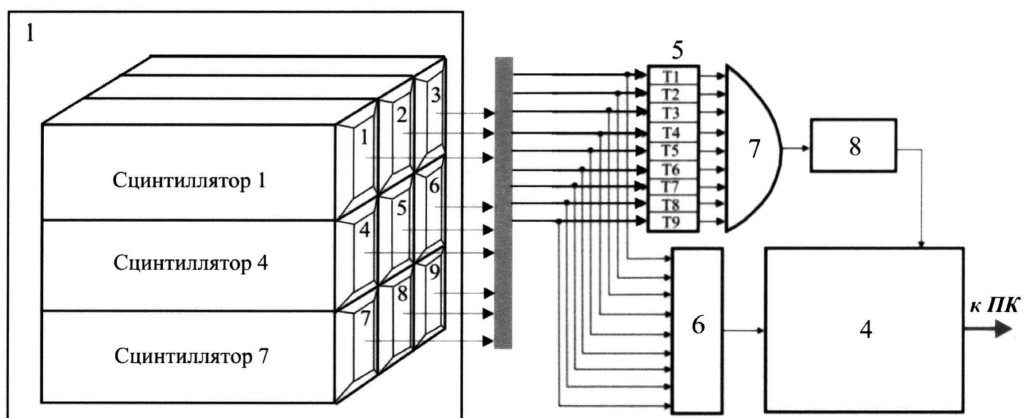


Фиг.4

Способ улучшения энергетического разрешения сцинтиляционного гамма-спектрометра

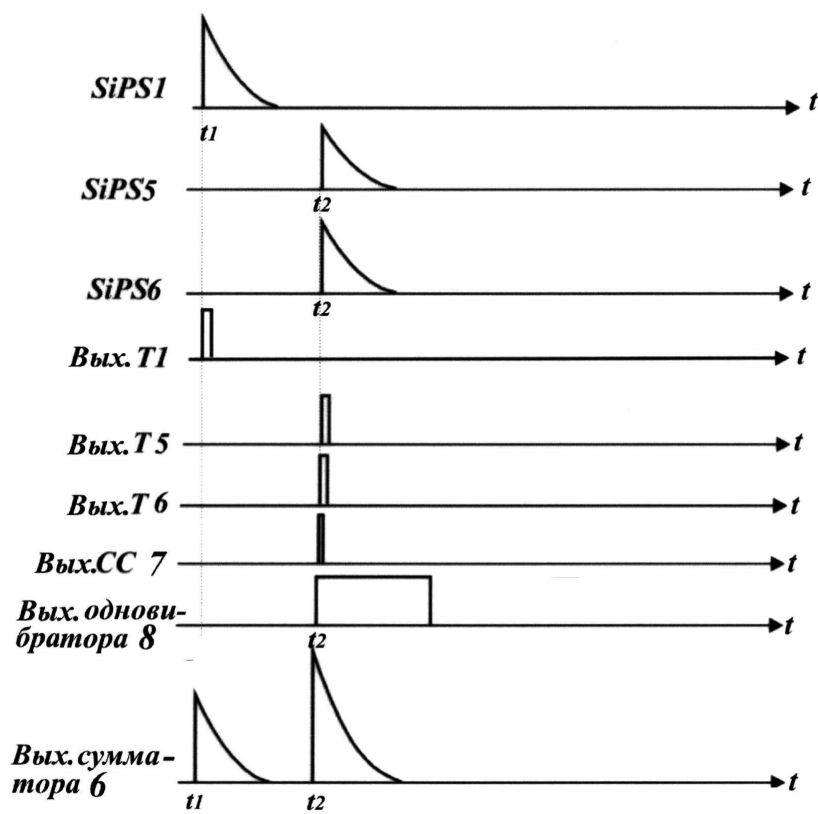


Фиг.5



Фиг.6

Способ улучшения энергетического разрешения сцинтиляционного гамма-спектрометра



Фиг.7